1960—2017年黄土高原不同等级降水日数和强度时空变化特征

安 彬[1,2], 肖薇薇[2], 张淑兰[1,3], 张建东[1,3]

(1. 安康学院旅游与资源环境学院,陕西 安康 725000; 2. 安康市汉江水资源保护与利用工程技术研究中心,陕西 安康 725000; 3. 陕西省科协院士专家工作站,陕西 安康 725000)

摘 要: 降水日数及强度的变化特征研究对黄土高原应对气候变化及水资源开发利用具有重要的科学意义。利用1960—2017年黄土高原地区55个地面气象站逐日降水资料,分析了总降水和不同等级降水(小雨、中雨、大雨和暴雨)的日数、强度和降水量的时空变化规律,并量化各等级降水日数和强度对降水量增量的贡献。结果表明:(1)近58 a黄土高原地区不同等级降水日数和降水量,以及大雨和暴雨强度皆呈减少趋势,而总降水、小雨和中雨强度呈增加趋势,小雨日是黄土高原地区降水最主要的形式。(2)黄土高原地区总降水、小雨、中雨的降水日数和降水量及其变化趋势的空间分布格局基本一致,即总降水和小雨等级皆呈西南高、西北低,降幅呈南多北少格局;中雨等级自东南至西北方向递减,趋势呈南降北增的规律;大雨以上等级自东南至西北向递减,趋势呈中部增加、南北减少特征。各等级降水强度与对应降水量分布特征基本一致,但强度趋势的空间分布较为复杂。(3)黄土高原多数地区的降水量下降趋势是由降水日数的减少所致。降水日数趋势变化对降水增量起主要贡献的有总降水、小雨和中雨等级,空间格局呈南高北低特征;降水强度趋势变化对降水增量起主要贡献的仅有大雨以上等级,呈东北至西南方向高,而两侧低的空间特征。

关键词: 降水日数; 降水强度; 降水增量; 降水等级; 黄土高原

全球气候变暖下的降水变化研究一直是关注的热点问题之一。近年来,许多学者对降水时空演变特征、极端降水事件等方面展开了研究[1-4],也有学者探讨了降水日数、强度与降水量间的关系[5]。受自然地理环境差异的影响,降水量、降水日数及强度具有明显的区域性特征,如中国雨日呈南多北少、东多西少的空间特征[6],年雨日减少幅度明显高于降水量的减少,降水强度则表现增加趋势[7]。诸多研究表明,不同地区的不同等级降水日数、强度的变化趋势并不完全一致。白淑英等[8]研究发现贵州省的总降水及各等级降水日数不同程度的减少;吴昊旻等[9]研究发现浙江省的中雨、大雨日数表现出增加趋势,其他降水日数呈减少趋势;李慧芳等[5]研究海河流域不同等级的强度,发现大雨、暴雨呈不明显减少,小雨、中雨的降水强度小幅增加;袁宇锋等[10]发现北京夏季的弱、中等降水强度明显减少,进而导致总降水减少。综上,深入研究不同等级降水日数和强度的变化规律,更能全面了解区域降水特征。

黄土高原(33°41′~41°16′N,100°52′~114°33′E)处于我国东部季风区向西北干旱区的过渡地带[11],是典型雨养农业区,农林牧业生产高度依赖区域气候条件[12],该地区年均、夏秋季降水量减少,春冬季增加[11]。王麒翔等[13]分析指出,黄土高原年降水的减少幅度自东南向西北逐渐变小,侵蚀性降水量(12 mm)显著减少。赵安周等[14]对黄土高原地区极端降水事件时空特征进行了分析,表明该区降水强度呈增加趋势,而小雨(10 mm)日数呈减少趋势。现有研究主要侧重黄土高原地区的年均、季节变化特征,而对不同等级降水日数、强度变化特征方面的研究鲜有报道。在全球变暖背景下,深入研究黄土高原不同等级降水量、日数和强度变化,可以直接

收稿日期: 2020-08-19; **修订日期:** 2020-12-26
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41230852);陕西省人社厅项目(RS17);陕西省教育厅项目(19JK0004,20JK0009);安康学院高层次人才引进项目(182401245)
作者简介: 安彬(1988-),男,讲师,研究方向为区域环境变化与GIS应用. E-mail: leyang1007@126.com

或间接判断该地区降水是否分配均匀,对于厘清不同等级降水的时空演变规律具有重要意义。籍此,本文利用黄土高原地区1960—2017年降水资料,分析不同等级的降水量、日数和强度的变化趋势及其空间格局特征,并量化降水日数和强度对降水增量的贡献程度,以期加深对黄土高原降水变化特征的认识,为合理利用水资源、旱涝灾害防治、提高农业生产提供一定依据。

1　数据与方法

1.1　数据来源

采用的日降水资料均来自中国气象数据网(http://data.cma.cn/),运用RHtest方法[15]对降水数据进行质量检查。依据站点的缺失数据低于2%、观测时间最长及数据可获取性原则,最终确定了黄土高原地区58 a(1960—2017年)逐日降水数据,有效气象站点55个,具体位置如图1所示。黄土高原降水等级划分参照中国气象局颁布的“24 h降水等级划分标准”,将日降水量分为4个等级:小雨(0.1~9.9 mm)、中雨(10.0~24.9 mm)、大雨(25.0~49.9 mm)和暴雨(≥50.0 mm),以此标准统计各站不同等级降水日数和降水量,并将4个等级的降水日数(或降水量)之和记为总降水日数(或总降水量)。总(各等级)降水量与总(各等级)降水日数的比值记为总(各等级)降水强度。

1.2　研究方法

1.2.1　*分析方法*　不同等级降水日数、强度和降水量的长期趋势采用线性拟合计算[16],并检验其显著性,分为不显著($P > 0.05$)、显著($P < 0.05$)和极显著($P < 0.01$);各降水指标的空间表达采用ArcGIS 10.2中反距离权重插值法[17]。

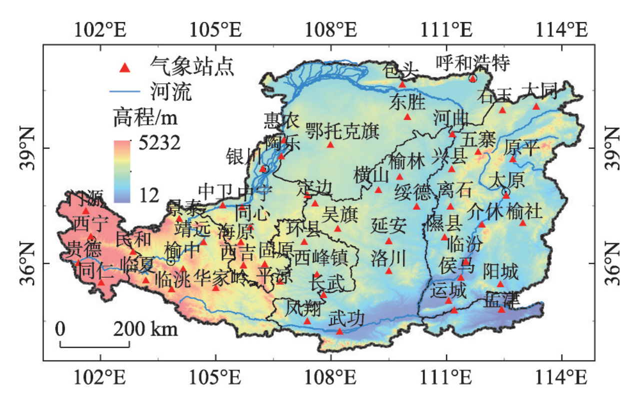


图1　研究区气象站点位置示意图

Tab. 1　Location meteorological sites in the Loess Plateau

1.2.2　*降水日数和强度对降水增量分析*　一个地区的降水强度和日数的长期趋势共同影响区域降水量的变化趋势[18]。Karl等[19]认为降水量变化可分解为:降水日数趋势变化所引起的降水量趋势值分量,降水强度趋势变化所引起的降水量趋势值分量,被广泛应用[18,20]。计算公式如下:

$$Trend_{pdz} = pTrend_{pd} \tag{1}$$

$$Trend_{piz} = Trend_{p} - Trend_{pdz} \tag{2}$$

式中:p表示有效降水日的降水量($mm \cdot d^{-1}$);$Trend_{pd}$表示降水日数趋势变化($d \cdot a^{-1}$);$Trend_{pdz}$表示降水日数趋势变化所引起的降水增量($mm \cdot a^{-1}$);$Trend_{p}$表示降水量趋势变化($mm \cdot a^{-1}$);$Trend_{piz}$表示降水强度趋势变化所引起的降水增量($mm \cdot a^{-1}$)。若$Trend_{pdz}$($Trend_{piz}$)为正值时,表示降水日数(降水强度)趋势变化所引起的降水量趋势增加;$Trend_{pdz}$($Trend_{piz}$)为负值时,则表示相反含义。

为了进一步比较各等级降水日数和强度对降水增量的贡献差异,采用绝对值差值与有效降水日的降水量比值计算[18]:

$$R = \frac{\left(\left|Trend_{pdz}\right| - \left|Trend_{piz}\right|\right)}{p} \times 100\% \tag{3}$$

式中:R为差值百分数;$R > 0$时,表示降水日数趋势引起的降水增量大于降水强度的降水增量;$R < 0$时,则表示相反意义。

2　结果与分析

2.1　不同等级降水日数、强度及降水量时空特征

2.1.1　*降水日数、强度及降水量的时间特征*　从黄土高原地区1960—2017年不同等级降水量、日数及强度的长期变化趋势可知(图2),黄土高原地区年总降水日数以$-0.239\ d \cdot a^{-1}$的速率呈极显著减少趋势($P < 0.01$),最高值为1964年的120.40 d,最低值为1997年的61.09 d,多年平均值为81.00 d。总降水日数呈“多-少-多”年代际变化特征,1960s平均总降水日数达到88.56 d,为研究时段最多;之后持续下降,到1990s只有75.02 d,为研究时段最少,2000s转为小幅上升,2011—2017年增加到78.33 d(表1)。各等级降水日数均呈波动减少趋势,且小雨日减少幅度最大,中雨、暴雨日次之,大雨日最

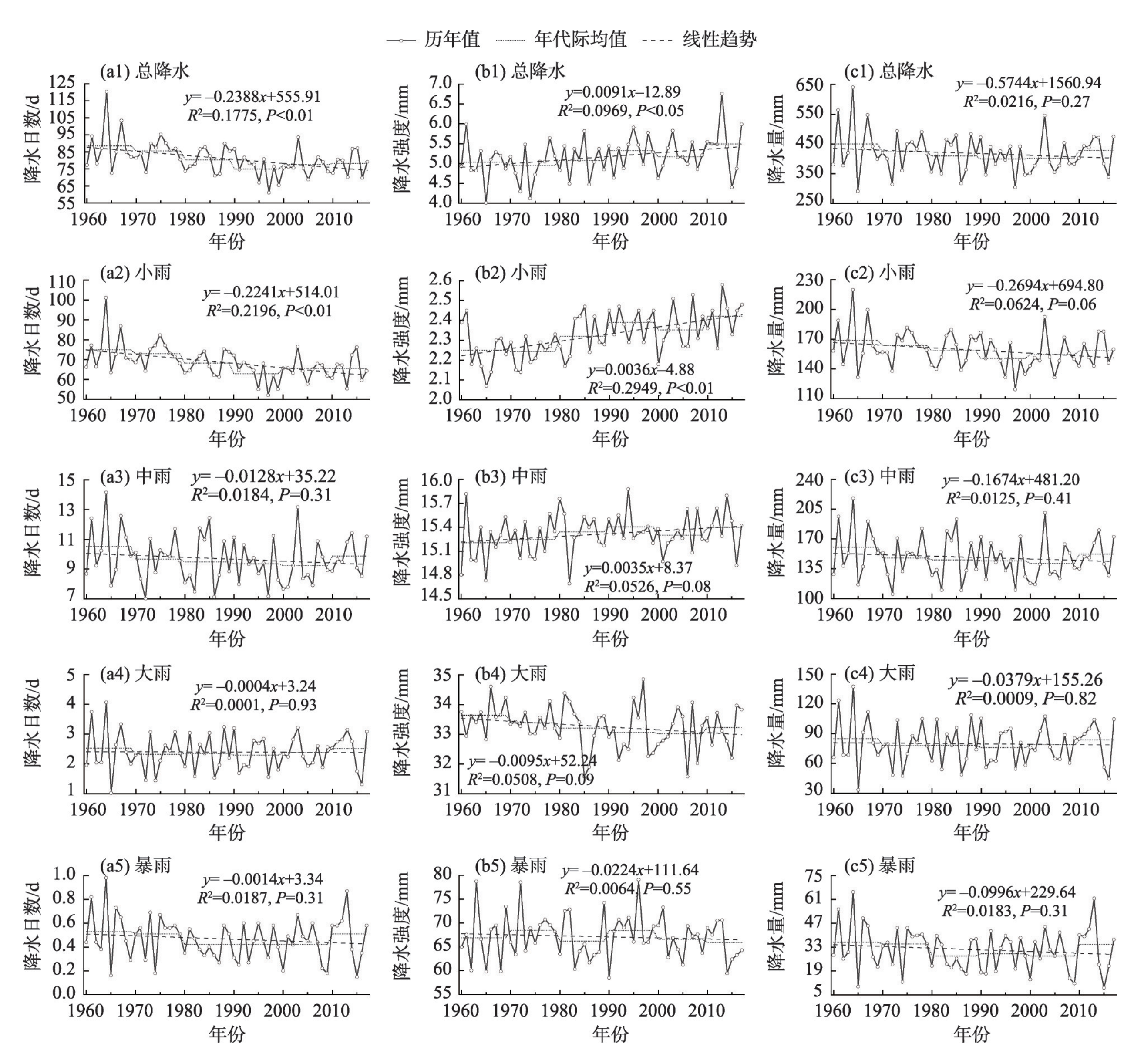


图2 黄土高原不同等级降水日数(a1～a5)、强度(b1～b5)和降水量(c1～c5)趋势变化

Fig. 2 Trends of precipitation days (a1−a5), intensity(b1−b5) and rainfall(c1−c5) with different grades in the Loess Plateau

表1 黄土高原降水日数、强度及降水量年代际均值

Tab. 1 Interdecadal mean values of precipitation days, intensity and precipitation over the Loess Plateau

年代际	降水日数/d					降水强度/mm					降水量/mm				
	总降水	小雨	中雨	大雨	暴雨	总降水	小雨	中雨	大雨	暴雨	总降水	小雨	中雨	大雨	暴雨
1960s	88.56	74.98	10.52	2.53	0.53	5.04	2.25	15.21	33.64	66.91	449.88	168.69	160.30	84.98	35.90
1970s	85.54	73.04	9.67	2.32	0.51	4.95	2.24	15.25	33.39	68.49	423.89	163.90	147.52	77.71	34.76
1980s	80.44	68.19	9.48	2.35	0.42	5.08	2.32	15.34	33.21	66.20	409.67	158.27	145.47	78.08	27.86
1990s	75.02	62.94	9.36	2.29	0.42	5.33	2.39	15.41	33.07	68.39	399.83	150.57	144.32	75.83	29.11
2000s	77.59	65.55	9.24	2.39	0.42	5.17	2.35	15.30	33.02	66.60	402.50	154.43	141.33	78.95	27.79
2011—2017	78.33	65.41	9.88	2.52	0.51	5.50	2.42	15.40	33.23	65.88	428.58	158.10	152.34	83.68	34.46
1960—2017	81.00	68.45	9.68	2.40	0.47	5.16	2.33	15.31	33.26	67.12	418.73	159.02	148.42	79.74	31.55

小。除小雨日减少趋势极显著外，其他等级降水日数均不显著（$P>0.05$）。与总降水日数年代际变化特征基本一致，小雨、大雨和暴雨日在1960s均为各年代最大值，随后逐渐减小持续到1990s；进入21世纪以后，均转为小幅上升。中雨日由1960s的10.52 d持续减少到2000s的9.24 d，在2011—2017年间则略有回升。

黄土高原地区多年平均总降水强度为5.16 mm，变化范围介于4.01 mm（1965年）~6.76 mm（2013年）之间，总体上呈波动显著上升趋势（$P<0.05$），其气候倾向率为0.0091 mm·a^{-1}。近58 a来，小雨和中雨强度多年平均分别为2.33 mm、15.31 mm，以0.0036 mm·a^{-1}、0.0035 mm·a^{-1}速率波动上升，其中小雨强度上升趋势极显著（$P<0.01$）；大雨和暴雨强度多年平均分别为33.26 mm、67.12 mm，以-0.0095 mm·a^{-1}、-0.0224 mm·a^{-1}速率波动下降，趋势均未通过0.05显著性水平检验。各等级降水强度的年代际变化显示，总降水和小雨强度1960s属偏多阶段，1970s为各年代最低，1980s至1990s期间有所增大，但在2000s略有下降，在2011—2017年上升至各年代最高。中雨强度呈倒"V"型曲线变化，1960s的15.21 mm强度为各年代最低，至1990s持续增大并达到最高的15.41 mm，尔后转为下降。大雨强度则呈"V"型变化，1960s的33.64 mm强度为各年代最高，持续减少至2000s并达到各年代最低值（33.02 mm），2011—2017年略有回升。暴雨强度在1970s为各年代最高，自1980s以来波动下降，至2011—2017年达到各年代最低。

近58 a黄土高原年均降水量在291.22 mm（1965年）~640.40 mm（1964年）间变化，多年平均降水量为418.73 mm，低于1961—2014年的平均值（422.0 mm）[11]，以-0.574 mm·a^{-1}速率呈不显著减少趋势（$P>0.05$），表明黄土高原地区干旱风险更加严峻。各量级降水量皆呈不显著的减少趋势（$P>0.05$），其中减幅最大的为小雨量，中雨、暴雨量次之，大雨量最小，与降水日数减幅排序一致。年代际变化显示，总降水量、小雨和大雨量在1960s为各年代最高，之后持续减少至1990s达到各年代最低，2000s以后略有回升；1960s的中雨和暴雨量也为各年代最高，之后持续减少至2000s并为各年代最低。

综上，黄土高原地区不同等级降水日数及强度的趋势变化、年代际特征并不完全一致。统计数据显示，近58 a小雨、中雨、大雨和暴雨日分别为68.45 d、9.68 d、2.40 d、0.47 d，占年均总降水日的84.51%、11.95%、2.96%、0.58%。由此可见，小雨日是黄土高原地区降水最主要的形式，其降水量占全年降水量的37.98%。但中雨、大雨、暴雨日数对全年降水的贡献不能忽视，其降水量分别占年降水量的35.44%、19.04%、7.54%。另外，在1990s之前，黄土高原地区处于降水日数和降水量减少、降水强度增加阶段，之后转为降水日数和降水量增加、降水强度减少阶段。

2.1.2　降水日数、强度及降水量空间特征　梳理黄土高原地区各站点不同等级降水数据，发现部分站点只有少量甚至无暴雨日，故本文仅分析总降水、小雨、中雨、大雨的降水空间特征。基于自然间断点法的分类原则，计算近58 a黄土高原各站点降水日数、强度和降水量的多年平均值，进而得到其空间分布。由图3可知，黄土高原总降水和小雨日数皆呈西南高、西北低的格局，均以青海门源站最高，计算发现各站小雨日占总降水日数的比例介于78.45%~91.31%。中雨和大雨以上日数自东南至西北递减，其中，中雨日在西部形成与总降水日数类似的高值区；中雨日数以黄土高原中南部的长武站最高、西北部的惠农站最低，大雨以上日数则以东部孟津最多、西部贵德站最少。总降水、中雨和大雨以上降水强度皆呈东南高、西北低的格局，小雨强度自东至西形成"高-低-次高"态势。各等级降水量与其降水强度的空间分布特征一致。计算各站小雨、中雨、大雨以上降水量与总降水的比值发现，黄土高原67.09%的区域以小雨降水量为主，集中分布在包头—平凉站以西的广大区域；6.85%的地区以中雨降水量为主，大致分布在山西东南部、河南北部等地；以大雨以上降水量为主占到全区总面积的26.06%，集中分布在汾渭谷地。

黄土高原地区总降水日数的减少幅度呈南多北少、东多西少态势，其中甘肃环县站（-0.56 d·a^{-1}）减幅最为明显（图4）；以0.14~0.28 d·a^{-1}的减幅分布最广，主要分布在山西东南部以外、陕北北部、甘肃榆中至内蒙古东胜一带，占全部气象站点的40%。小雨日数变化趋势的空间分布与总降水相似，也以环县站（-0.53 d·a^{-1}）减幅最为明显，但其降幅在0.14~0.28 d·a^{-1}的站点数更多，占全部站点的52.73%。值得注意的是，黄土高原西部局部地区的

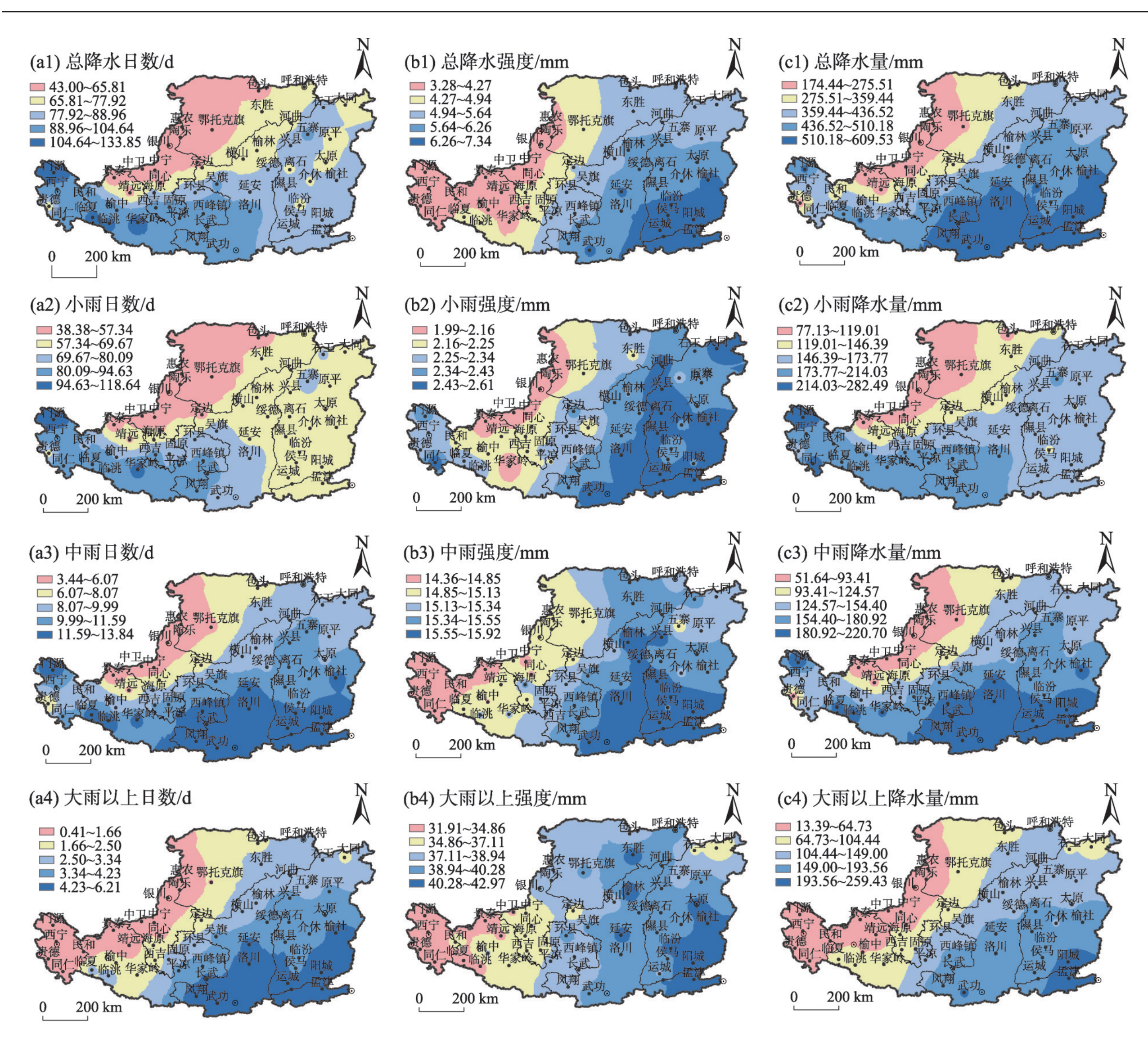


图3 1960—2017年黄土高原不同等级平均降水日数(a1 ~ a4)、强度(b1 ~ b4)和降水量(c1 ~ c4)空间格局

Fig. 3 Spatial pattern of average precipitation days(a1-a4), intensity(b1-b4) and rainfall(c1-c4) with different grades in the Loess Plateau during 1960-2017

总降水和小雨日数呈增加趋势,均以青海西宁站最为明显。中雨日数整体呈南部减少、北部增加的纬向地带性规律,其中呈减少趋势的站点达到37个,占全区的67.27%,以山西临汾站(−0.063 d·a^{-1})减幅最为明显;在黄土高原地区东北部的大同、西部的西宁等地中雨日数增加明显。大雨以上日数变化趋势空间上呈中部增加、南北减少特征,整体上以减少趋势为主,呈减少趋势的站点有32个,占全区的58.18%。

黄土高原大部分地区的总降水强度呈上升趋势,增幅整体呈中部高周边低的空间格局,毛乌素沙地东南边缘、山西北部等地增幅较为明显,以陕西榆林站(0.0296 mm·a^{-1})最为明显;此外,西部榆中、东中部榆社等7个站点的总降水强度小幅下降。小雨降水强度变化趋势表现出中北部和东北部上升快、东部和西部上升慢,全区呈上升的站点达到45个,以榆林站(0.0096 mm·a^{-1})上升幅度为全区最高;黄土高原中部、南部的10个站点的小雨强度表现出下降趋势,最为明显的为陕西延安站(−0.0033 mm·a^{-1})。黄土高原有36个站点中雨强度表现上升趋势,占全区的65.45%,其中东北和西北地区增幅较多,以宁夏陶乐站(0.023 mm·a^{-1})最为明显;在中东部的榆社-洛川-兴县、西部西南地区则表现出下降趋势。大雨以上强度趋势主要表现为中部偏西方向上升、东西部下降的空间格局,呈下降趋势的站点有33个,占全区的60%,上升和下降幅度最大

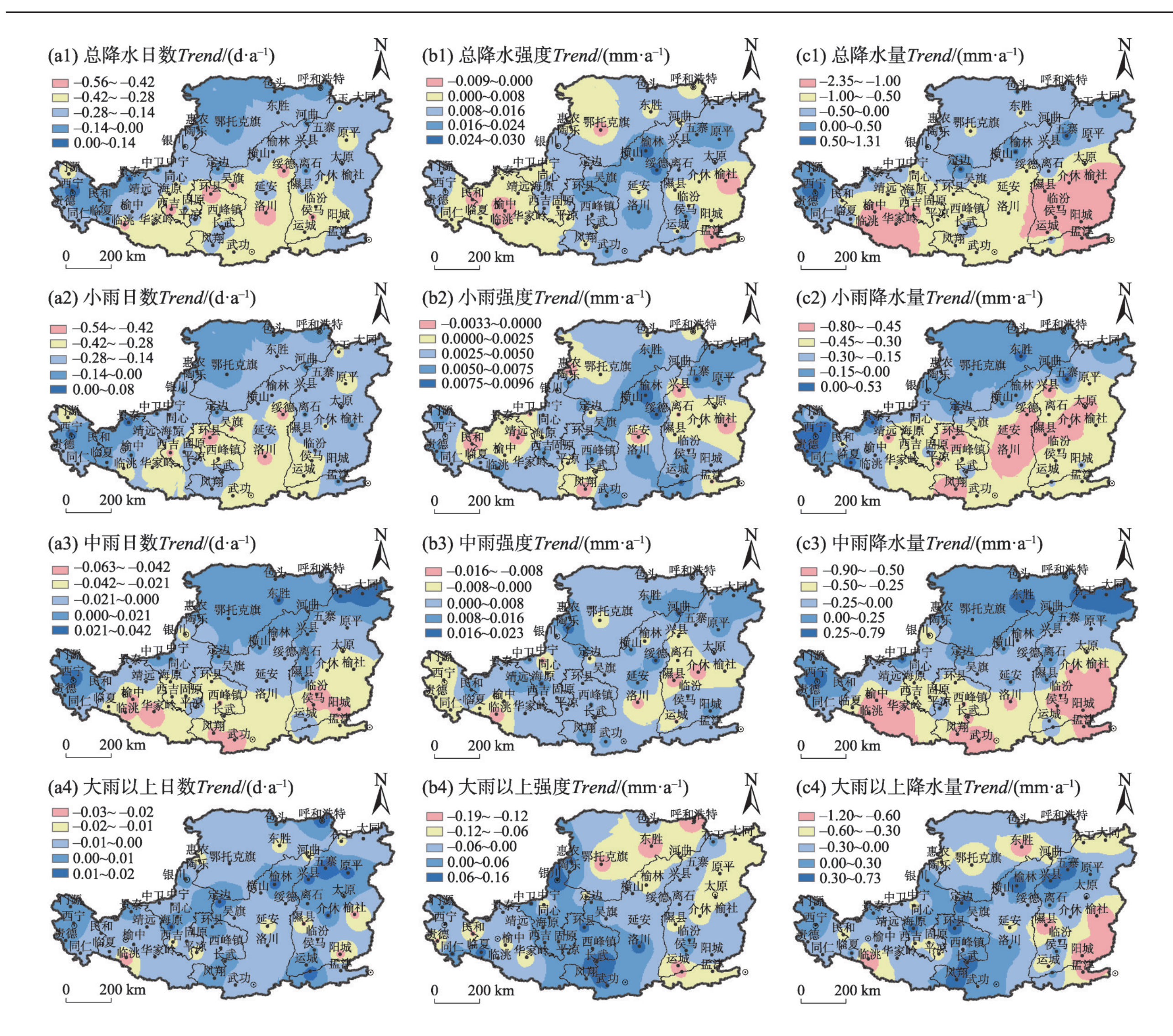


图4　黄土高原不同等级降水日数(a1～a4)、强度(b1～b4)和降水量(c1～c4)变化趋势(*Trend*)空间格局

Fig. 4　Spatial pattern of the trends of precipitation days(a1−a4), intensity(b1−b4) and rainfall(c1−c4) with different grades in the Loess Plateau

的分别是银川(0.16 mm·a^{-1})、呼和浩特(−0.19 mm·a^{-1})。

整体上，黄土高原地区总降水量呈下降趋势的站点达45个，且降幅表现出南多北少，南部东西方向上“多-少-多”空间态势，呈上升趋势站点多分布在西部青海省内。小雨降水量变化趋势的空间格局与总降水量基本一致，47个站点呈下降趋势，在南部东西方向上降幅呈现“少-多-少”特征。中雨量变化趋势呈南降北升特征，呈下降趋势的站点有34个。大雨以上降水量变化趋势的空间特征较为复杂，共有35个站点呈下降趋势，其中山西东南部降水量降幅最为明显，宁夏海原至山西原平东西向条带和宁夏银川至陕西武功的南北向条带区域的大雨以上降水量呈增加趋势。

2.2　降水日数和强度趋势变化对降水增量的影响

为厘清降水日数及强度引起的黄土高原地区降水增量的贡献差异，利用公式(1)~公式(3)计算了不同等级降水日数趋势变化引起的降水增量($Trend_{pdz}$)、降水强度趋势变化引起的降水增量($Trend_{piz}$)，以及二者之间的差值百分数(R)，结果见表2和图5。由表2可知，1960—2017年黄土高原地区总降水日数的$Trend_{pdz}$为−1.233 mm·a^{-1}，即总降水日数的变化趋势引起总降水量趋势减小；总降水强度的$Trend_{piz}$为0.659 mm·a^{-1}，即总降水日数的变化趋势引起总降水量趋势增加，二者差值百分数R为11.12%，表明总降水日数趋势变化在总降水增量中起主要贡献。小雨、中雨、大雨和暴雨日数的$Trend_{pdz}$分别为−0.521 mm·a^{-1}、−0.196 mm·a^{-1}、

表2　黄土高原不同等级降水日数和强度趋势变化对降水增量贡献

Tab. 2　Contribution to precipitation increment of trends of precipitation days and intensity with different grades in Loess Plateau

等级	p/(mm·d^{-1})	$Trend_{p}$/(mm·a^{-1})	$Trend_{pd}$/(d·a^{-1})	$Trend_{pdz}$/(mm·a^{-1})	$Trend_{pi}$/(mm·a^{-1})	$Trend_{piz}$/(mm·a^{-1})	R/%
总降水	5.1648	−0.5744	−0.2388	−1.2333	0.0091	0.6589	11.1215
小雨	2.3263	−0.2695	−0.2241	−0.5213	0.0036	0.2518	11.5851
中雨	15.3139	−0.1673	−0.0128	−0.1960	0.0035	0.0287	1.0925
大雨	33.2587	−0.0356	−0.0004	−0.0133	−0.0095	−0.0223	−0.0270
暴雨	67.1190	−0.1020	−0.0014	−0.0940	−0.0224	−0.0080	0.1280

注：p表示平均降水；$Trend_{p}$表示降水趋势；$Trend_{pd}$表示降水日数趋势；$Trend_{pdz}$表示降水日数趋势的降水增量；$Trend_{pi}$表示降水强度趋势；$Trend_{piz}$表示降水强度趋势的降水增量；R表示差值百分数。下同。

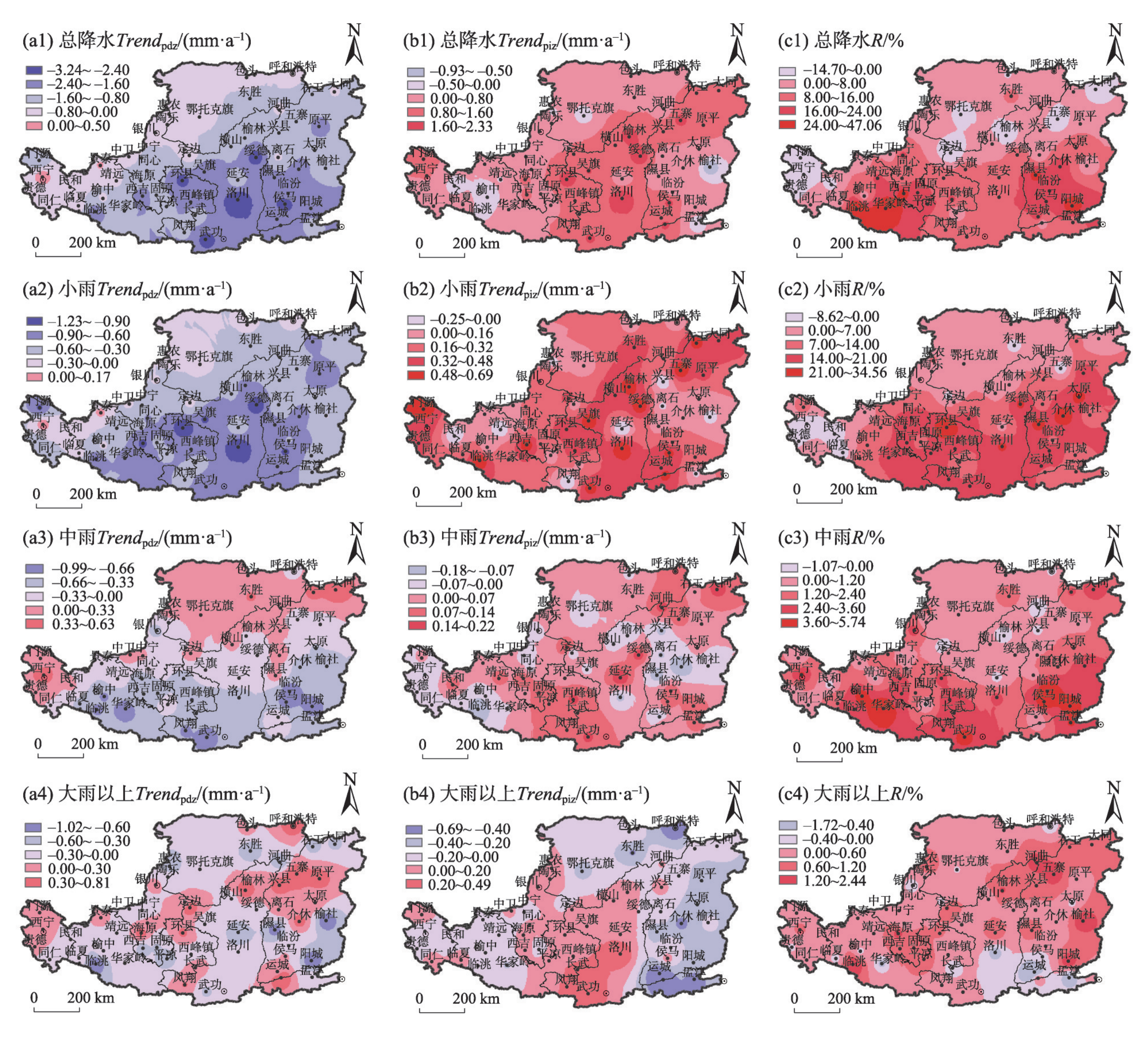


图5　黄土高原不同等级降水的$Trend_{pdz}$(a1～a4)、$Trend_{piz}$(b1～b4)和R(c1～c4)空间格局

Fig. 5　Spatial pattern of $Trend_{pdz}$(a1–a4), $Trend_{piz}$(b1–b4) and R(c1–c4) with different grades precipitation intensity in the Loess Plateau

−0.013 mm·a^{-1}、−0.094 mm·a^{-1}，相应的$Trend_{piz}$分别为0.252 mm·a^{-1}、0.029 mm·a^{-1}、−0.022 mm·a^{-1}、−0.008 mm·a^{-1}。各等级降水日数的$Trend_{pdz}$和除大雨、暴雨强度外的$Trend_{piz}$均低于0，只有大雨等级的差值百分数R为负值，说明小雨、中雨和暴雨日数的趋势变化在降水增量中起主要贡献，而大雨降水强度的趋势变化在降水增量中起主要贡献。

由图5可知，黄土高原地区不同等级降水的

$Trend_{pdz}$、$Trend_{piz}$与各等级降水日数和强度的趋势空间格局相似，即各等级降水日数的$Trend_{pdz}$和大雨以上降水强度的$Trend_{piz}$以负值为主，引起黄土高原地区降水量趋势减少；总降水、小雨和中雨强度的$Trend_{piz}$以正值为主，引起全区降水量趋势增加。多数区域的总降水日数趋势变化在总降水增量中起主要贡献，与我国西北东部、甘肃宁夏南部夏季雨日变化趋势对降水增量的贡献高于强度的结论相似[18]；其贡献率空间上大体呈南高北低格局，中南部在东西方向上呈“高-低-高”相间分布。黄土高原青海中西部及陕西定边和榆林、山西五寨和大同串状分布区域的总降水强度变化趋势对总降水增量起主要贡献。小雨和中雨日数趋势变化对降水增量起主要贡献，空间格局均呈南高北低，但在东西方向上略有差异：小雨日数的$Trend_{pdz}$自东南向西北呈“次高-高-次高-低”相间分布，而中雨日数的$Trend_{pdz}$仅在中南部的东西向上呈“高-低-高-低-高”分布。小雨强度变化趋势为主要贡献的区域在黄土高原的青海中部、青甘交界处，另外在东北部的五寨、东胜等地零星分布；中雨强度起主导作用的零星散布在中北部盐池、榆林和河曲等地。与总降水、小雨和中雨等级相比，大雨以上强度趋势变化对降水增量起主要贡献的分布区域更广，主要集中在关中东部、山西西南部及河南西北部等；大雨以上雨日贡献率高的区域有黄土高原东北部、西南部偏中部及山西东部，自东北向西南呈高低相间分布。

3 讨 论

全球变暖背景下，黄土高原地区年均降水量、小雨日数表现出减少趋势[11,14]，而总降水强度增加明显[14]，以上研究成果与本研究结论基本一致，但计算结果存在一定差异，可能受研究时段、气象站点及数据处理方法不同的影响。本研究进一步发现黄土高原地区总降水、小雨、中雨降水量和日数皆呈减少趋势，对应的降水强度呈增加趋势；大雨及暴雨日数和强度皆呈减少趋势。结合各等级降水日数在总降水日数的占比，以及对应降水量在总降水量的占比，发现小雨日是该区降水最主要的形式。对于我国不同等级降水量影响程度的研究表明，在弱降水方面受降水日数趋势变化的影响程度高[18,21]，本研究中多数区域与该结论吻合；而强降水等级主要受降水强度趋势变化影响[18,22]，仅有黄土高原东南部的晋豫陕交界处支持该观点。因此，黄土高原多数地区的降水量下降趋势是由降水日数的减少所致。未来研究中，仍需利用更高分辨率的气象数据，同时综合考虑大气环流、水汽输送等多因素影响，进一步探讨黄土高原地区不同等级降水所显现出的时空差异。另外基于Hurst指数分析表明黄土高原未来降水量持续降低[11]，将加剧黄土高原干旱风险[23]。在各等级降水量和日数减少、多数等级降水强度增加的背景下，黄土高原地区应该加大农田水利基础设施、建立科学的排灌制度，着重解决强降水所带来的农业灾害威胁，最大限度地减少对农作物的危害。

4 结 论

利用1960—2017年黄土高原地区55个地面气象站逐日降水资料，分析总结了不同降水等级下降水日数和强度的时空分布规律，并量化各等级降水日数和强度对降水影响程度，得出以下结论：

（1）时间上，黄土高原地区不同等级降水日数及强度的趋势变化不完全一致。总降水、小雨、中雨、大雨、暴雨日数和降水量皆呈不同程度的减少趋势，总降水和小雨日减少趋势极显著（$P<0.01$）。小雨日是黄土高原地区降水最主要的形式，其降水量和日数占全年的37.98%、84.51%。总降水强度以0.0091 $d\cdot a^{-1}$速率增加，小雨和中雨强度波动上升，大雨和暴雨强度波动下降，总降水和小雨日减少趋势分别为显著（$P<0.05$）、极显著（$P<0.01$）。在1990s—2000s之前，黄土高原地区处于降水日数和降水量减少、降水强度增加阶段，之后转为降水日数和降水量增加、降水强度减少阶段。

（2）空间上，黄土高原地区各等级降水日数、强度和降水量及其变化率的分布格局特征各异。总降水、小雨、中雨的降水日数与各自降水量空间格局基本一致，即总降水和小雨等级皆呈西北低、西南高，降幅呈南多北少格局；中雨等级自东南至西北向递减，趋势呈南降北增的规律；大雨以上等级自东南至西北方向递减，趋势呈中部增加、南北减少特征。各等级降水强度与对应的降水量分布特征一致，但强度趋势的空间分布较为复杂。

（3）黄土高原多数地区的降水量下降趋势是由降水日数的减少所致。总降水、小雨、中雨和暴雨

日数的趋势变化在降水增量中起主要贡献，而大雨降水强度的趋势变化在降水增量中起主要贡献。总降水、小雨和中雨日数趋势变化对降水增量中起主要贡献呈南高北低的空间分布特征，但在东西方向上略有差异；大雨以上强度对降水增量起主要贡献呈东北-西南方向高、两侧低的空间分布特征。

参考文献(References)：

[1] 陈洁, 刘玉洁, 潘韬, 等. 1961—2010年中国降水时空变化特征及对地表干湿状况影响[J]. 自然资源学报, 2019, 34(11): 2440-2453. [Chen Jie, Liu Yujie, Pan Tao, et al. Spatiotemporal variation of precipitation in China and its impact on surface dry-wet conditions during 1961-2010[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(11): 2440-2453.]

[2] 杨佳, 郝桂珍, 张婧, 等. 1960—2016年冀西北地区降水时空变化特征研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(5): 117-123, 133. [Yang Jia, Hao Guizhen, Zhang Jing, et al. The spatial and temporal variation characteristics of precipitation in Northwest Hebei Province during 1960-2016[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30(5): 117-123, 133.]

[3] 孔锋, 史培军, 方建, 等. 全球变化背景下极端降水时空格局变化及其影响因素研究进展和展望[J]. 灾害学, 2017, 32(2): 165-174. [Kong Feng, Shi Peijun, Fang Jian, et al. Advances and prospects of spatiotemporal pattern variation of extreme precipitation and its affecting factors under the background of global climate change[J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(2): 165-174.]

[4] Xie Z Q, Du Y, Zeng Y, et al. Classification of yearly extreme precipitation events and associated flood risk in the Yangtze-Huaihe River Valley[J]. Science China Earth Sciences, 2018, 61(9): 1341-1356.

[5] 李慧芳, 殷淑燕. 海河流域不同等级降水强度和雨日的时空变化特征[J]. 中国农业气象, 2014, 35(6): 603-610. [Li Huifang, Yin Shuyan. Temporal and spatial variation of precipitation intensity and days with different grades in Haihe River Basin[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2014, 35(6): 603-610.]

[6] 汪卫平, 杨修群, 张祖强, 等. 中国雨日数的气候特征及趋势变化[J]. 气象科学, 2017, 37(3): 317-328. [Wang Weiping, Yang Xiuqun, Zhang Zuqiang, et al. The climatic characteristics and trends of rainy days over China[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2017, 37(3): 317-328.]

[7] 王颖, 施能, 顾骏强, 等. 中国雨日的气候变化[J]. 大气科学, 2006, 31(1): 162-170. [Wang Ying, Shi Neng, Gu Junqiang, et al. Climatic variations of wet days in China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2006, 31(1): 162-170.]

[8] 白淑英, 莫婷, 史建桥, 等. 近50 a贵州不同强度降水日数时空变化分析[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(2): 220-224. [Bai Shuying, Mo Ting, Shi Jianqiao, et al. Spatial and temporal variations of rainfall days with different intensities in Guizhou in recent 50 years[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(2): 220-224.]

[9] 吴昊旻, 廖必军, 蔡寿强. 浙江省不同强度降水日数的时空分布特征[J]. 干旱气象, 2012, 30(3): 360-366. [Wu Haomin, Liao Bijun, Cai Shouqiang. Temporal and spatial distribution characteristics of different level rainfall days in Zhejiang Province[J]. Journal of Arid Meteorology, 2012, 30(3): 360-366.]

[10] 袁宇锋, 翟盘茂, 李建, 等. 北京城、郊和山区不同强度等级降水变化特征比较[J]. 气候变化研究进展, 2017, 13(6): 589- 597. [Yuan Yufeng, Zhai Panmao, Li Jian, et al. Changes in classified precipitation in the urban, suburban and mountain areas of Beijing [J]. Climate Change Research, 2017, 13(6): 589-597.]

[11] 顾朝军, 穆兴民, 高鹏, 等. 1961—2014年黄土高原地区降水和气温时间变化特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(3): 136-143. [Gu Chaojun, Mu Xingmin, Gao Peng, et al. Characteristics of temporal variation in precipitation and temperature in the Loess Plateau from 1961 to 2014[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(3): 136-143.]

[12] 李志, 郑粉莉, 刘文兆. 1961—2007年黄土高原极端降水事件的时空变化分析[J]. 自然资源学报, 2010, 25(2): 291-299. [Li Zhi, Zheng Fenli, Liu Wenzhao. Analyzing the spatial-temporal changes of extreme precipitation events in the Loess Plateau from 1961 to 2007[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(2): 291-299.]

[13] 王麒翔, 范晓辉, 王孟本. 近50 a黄土高原地区降水时空变化特征[J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5512-5523. [Wang Qixiang, Fan Xiaohui, Wang Mengben. Precipitation trends during 1961-2010 in the Loess Plateau region of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(19): 5512-5523.]

[14] 赵安周, 朱秀芳, 潘耀忠. 1965—2013年黄土高原地区极端降水事件时空变化特征[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2017, 53(1): 43-50. [Zhao Anzhou, Zhu Xiufang, Pan Yaozhong. Spatiotemporal variations of extreme precipitation events in the Loess Plateau from 1965 to 2013[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science Edition), 2017, 53(1): 43-50.]

[15] Wang X L, Chen H, Wu Y, et al. New techniques for detection and adjustment of shifts in daily precipitation data series[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2010, 49(12): 2416-2436.

[16] 徐建华. 计量地理学[M]. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 2014. [Xu Jianhua. Quantitative Geography[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2014.]

[17] 汤国安, 杨昕. 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 第二版. 北京: 科学出版社, 2012. [Tang Guo'an, Yang Xin. Experimental Course on Spatial Analysis of Geographic Information Systems[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2012.]

[18] 徐新创, 张学珍, 戴尔阜, 等. 1961—2010年中国降水强度变化趋势及其对降水量影响分析[J]. 地理研究, 2014, 33(7): 1335-1347. [Xu Xinchuang, Zhang Xuezhen, Dai Erfu, et al. Research of trend variability of precipitation intensity and their contribution to precipitation in China from 1961 to 2010[J]. Geographical Research, 2014, 33(7): 1335-1347.]

[19] Karl T R, Knight R W. Secular trends of precipitation amount, fre-

quency, and intensity in the United States[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(2): 231−241.]

[20] 杨昭明, 张调风. 1961—2017年青藏高原东北部雨季降水量变化及其贡献度分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 22−28. [Yang Zhaoming, Zhang Tiaofeng. Analysis of precipitation change and its contribution in the rainy season in the northeast Qinghai-Tibet Plateau from 1961 to 2017[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1): 22−28.]

[21] 陈晓燕, 尚可政, 王式功, 等. 近50年中国不同强度降水日数时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2010, 27(5): 766−772. [Chen Xiaoyan, Shang Kezheng, Wang Shigong, et al. Analysis on the spatio-temporal characteristics of precipitation under different intensities in China in recent 50 years[J]. Arid Zone Research, 2010, 27(5): 766−772.]

[22] 林云萍, 赵春生. 中国地区不同强度降水的变化趋势[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2009, 45(6): 995−1002. [Lin Yunping, Zhao Chunsheng. Trends of precipitation of different intensity in China[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2009, 45(6): 995−1002.]

[23] 孙艺杰, 刘宪锋, 任志远, 等. 1960—2016年黄土高原干旱和热浪时空变化特征[J]. 地理科学进展, 2020, 39(4): 591−601. [Sun Yijie, Liu Xianfeng, Ren Zhiyuan, et al. Spatiotemporal changes of droughts and heatwaves on the Loess Plateau during 1960−2016 [J]. Progress in Geography, 2020, 39(4): 591−601.]

Spatio-temporal characteristics of precipitation days and intensity with different grades in the Loess Plateau during 1961−2017

AN Bin[1,2], XIAO Weiwei[2], ZHANG Shulan[1,3], ZHANG Jiandong[1,3]

(1. College of Tourism and Environment Resources, Ankang University, Ankang 725000, Shaanxi, China; 2. Engineering Technology Research Center for Water Resource Protection and Utilization of Hanjiang River, Ankang 725000, Shaanxi, China; 3. Academician and Expert Workstation of Shaanxi, Ankang 725000, Shaanxi, China)

Abstract: The study on the variation characteristics of precipitation days and intensity is significant for the Loess Plateau to cope with climate change and water resource exploitation. Based on the daily precipitation data of 55 surface meteorological stations in the Loess Plateau from 1960 to 2017, the temporal and spatial variability of rainfall, precipitation days, and intensity of the total precipitation and precipitation of different grades (light rain, moderate rain, heavy rain, and rainstorm) were analyzed. The contribution of precipitation days and intensity at each grade to precipitation increment was quantified. Results showed that the total precipitation, light rain, moderate rain, heavy rain, rainstorm days and rainfall, and the intensity of heavy rain and rainstorm all had a decreasing trend in the past 58 years. In contrast, the intensity of total precipitation, light rain, and moderate rain increased. Light rain day is the primary precipitation form in the Loess Plateau. The precipitation days of total precipitation, light rain, and moderate rain in the Loess Plateau were consistent with their respective spatial patterns; that is, the levels of total precipitation and light rain were higher in the southwest and lower in the northwest. The decreasing amplitude was more significant in the south than in the north; also, the moderate rain grades decreased from southeast to northwest, and trend showed the law of descending from south to increasing from north. The heavy rain and above grades decreased from southeast to northwest, and the trend also decreased in the middle and north and south. The precipitation intensity of each grade was consistent with the corresponding precipitation distribution characteristics. However, the spatial distribution of intensity trend was more complex. The decreasing trend of precipitation in most areas was due to the reduction in precipitation days. The primary contribution of precipitation days trend change to precipitation increment included total precipitation, light rain, and moderate rain. The spatial pattern of their contribution rate was high in the south and low in the north. While the primary contribution of precipitation intensity trend change to precipitation increment was for heavy rain and above, which was spatially characterized by high in the northeast-southwest and low in the east and west.

Keywords: precipitation days; precipitation intensity; precipitation increment; precipitation grades; the Loess Plateau